

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

GRADO DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA
TELECOMUNICACIÓN



Trabajo Fin de Grado

Estudio general sobre la infraestructura de los despliegues del
estándar 5G

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Alfonso de Parada Rodríguez

Tutor/es: Francisco Javier Escribano Aparicio

2020

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

**GRADO DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA
TELECOMUNICACIÓN**

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO GENERAL SOBRE LA INFRAESTRUCTURA DE LOS
DESPLIEGUES DEL ESTANDAR 5G

Autor: Alfonso de Parada Rodríguez

Tutor: Francisco Javier Escribano Aparicio

TRIBUNAL:

Presidente: Silvia Jiménez Fernández

Vocal 1º: Ricardo Jiménez Martínez

Vocal 2º: Francisco Javier Escribano Aparicio

FECHA: 29 / 09 / 2020

ÍNDICE

1. Introducción y objetivos	10
2. Tecnologías que conforman el 5G	12
2.1 Diferentes lanzamientos de 3GPP	13
2.1.1 Lanzamiento 14	14
2.1.2 Lanzamiento 15	16
2.1.3 Lanzamiento 16	16
2.2 Sistema de comunicaciones	18
2.2.1 Sistema <i>New Radio</i>	18
2.2.2 Red central 5G <i>NextGen</i>	22
2.3 Otras tecnologías relacionadas con 5G	25
2.3.1 <i>Edge computing</i>	25
2.3.2 <i>Beamforming</i>	29
2.3.3 MIMO	30
3. Infraestructuras	32
3.1 Diferentes opciones de implementación	32
3.1.1 LTE EPC	32
3.1.2 Arquitectura de destino con NR y 5GC independiente	35
3.1.3 Conectividad dual	38
3.2 5G NSA vs 5G SA	39
3.3 Oferta mundial de 5G actualmente	40
3.4 El impacto económico del despliegue del 5G	42
4. Conclusiones	46
5. Bibliografía	49

RESUMEN

El mundo de las tecnologías está en un continuo avance, adaptándose a las nuevas necesidades que surgen en el campo de las telecomunicaciones. Para conseguir alcanzar los estándares de la tecnología 5G se han tenido que adaptar tecnologías ya existentes y desarrollar otras nuevas. Este TFG trata de hacer un estudio sobre estas tecnologías, viendo cómo han ido evolucionando las que ya existían y estudiando las que han surgido nuevas. También, se hace un estudio sobre las formas de despliegues disponibles de esta tecnología 5G en la actualidad y cómo las distintas compañías operadoras compiten por conseguir las bandas de frecuencias que más se adecuen a los servicios que quieran ofertar.

PALABRAS CLAVE

5G, alta velocidad, despliegue, tecnología, lanzamiento, sistemas, comunicaciones, infraestructura, implementación, *Edge computing*, *New Radio*, MIMO, LTE, *NextGen*, *Beamforming*, IoT, *Quality of Service*, 5G Core

SUMMARY

The technological world is constantly evolving, adapting to the new needs that are arising in the telecommunications field. To develop the 5G standards some technologies have been developed and some existing technologies have had to be adapted. This TFG makes a study about these technologies, seeing how the existing ones have evolved and studying how the new ones have emerged. Moreover, it makes a study about the available deployments of this technology 5G nowadays and how the different operating companies compete against each other to get the frequency bands which fit better the services they desire to offer.

KEYWORDS

5G, high speed, deployment, technology, release, systems, communications, infrastructure, implementation, *Edge computing*, *New Radio*, MIMO, LTE, *NextGen*, *Beam Forming*, IoT, *Quality of Service*, 5G Core

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las principales mejoras que supondrá el 5G de elaboración propia.

Figura 2. Esquema del acceso radio 5G elaborado por Ericsson.

Figura 3. Resumen de los lanzamientos 3GPP de elaboración propia.

Figura 4. Table que relaciona el espaciado de subportadoras y el ancho de banda de elaboración propia.

Figura 5. División de 5G NR en subtramas de elaboración propia

Figura 6. Cadena de codificación de elaboración propia.

Figura 7. Esquema de las etapas del procesamiento del SCH de elaboración propia.

Figura 8. Aquitectura de 5G NextGen elaborada por devopedia.org

Figura 9. Esquema de *cloud computing* de elaboración propia.

Figura 10. Comparativa entre cloud computing y Edge computing elaborado por *blogthinkbig.com*

Figura 11. Comparativa Beamforming con un router WIFI realizada por siliceo.es

Figura 12. Mapa de señales que utilizan MIMO aprovechando *multipath* elaborado por *comunicacionesinalambricashoy.es*

Figura 13. Esquema de LTE/EPC de elaboración propia.

Figura 14. Esquema de los diferentes nodos de LTE EPC de elaboración propia.

Figura 15. Esquema de red con 5GC independiente de elaboración propia.

Figura 16. Esquema de conectividad dual de elaboración propia.

Figura 17. Tabla de bandas y su frecuencia en enlace ascendente / descendente de elaboración propia.

Figura 18. Infografía del avance del 5G en el mercado global elaborado por *gsma.com*

RESUMEN EXTENDIDO

Este TFG hace un estudio de las tecnologías que conforman actualmente el 5G, haciendo antes un repaso a los estándares propuestos, a través de los distintos lanzamientos, por la asociación 3GPP. En estos lanzamientos veremos desde la evolución de *Long Term Evolution* (LTE) asociada a la nueva interfaz aérea NX con lo que se trajo la capacidad de transmitir distintos paquetes al dispositivo móvil conocida como multipunto con *Multiple input multiple Output* (MIMO), del lanzamiento 14, hasta el desarrollo del 5G NR con mejoras como el *Beamforming*, *Integrated Access Backhaul* (IAB) y la posibilidad de desarrollar funciones relacionadas con el *Industrial Internet of Things* (IIoT), *Ultra Reliable Low Latency Communication* (URLLC) y los sistemas de transporte inteligente.

Se profundizará sobre los principales sistemas de comunicación de radio, como el sistema 5G NR o la red central 5G *NextGen*. Del primero se hará un estudio sobre sus diferencias con LTE, las cuales se basan en el rango de frecuencias en las que operan y la posibilidad del espaciado entre subportadoras, sus principales características como la codificación *Low Density Parity Check* (LDPC) y el procesamiento del *Shared Channel* (SCH). Del sistema 5G *NextGen* veremos las técnicas que se están usando para lograr unos requisitos basados en la flexibilidad y eficiencia, como el *Software Defined Network* (SDN), *Network Function Virtualization* (NFV) o la segmentación de red.

Para lograr alcanzar los estándares del 5G son tan importantes los avances en los sistemas de comunicación de radio como las demás tecnologías que se desarrollan. Se hará una recopilación de información en la que se contemplará el funcionamiento de tecnologías que conseguirán reducir al mínimo los términos de latencia, como el *Edge computing*, mejorarán la transmisión inalámbrica para tener mayor calidad de señal, como el *Beamforming*, y reducirán la tasa de error y aumentarán la eficiencia espectral de un sistema de comunicación, como MIMO.

Este TFG también se centrará en los diferentes despliegues de las tecnologías que, hoy en día, es lo que conocemos como 5G. Estos despliegues son la arquitectura *Long term evolution/evolved packet core* (LTE/EPC) donde haremos un estudio sobre los diferentes nodos que la conforman; la arquitectura de destino con *New Radio* (NR) y 5G Core independiente, en la que se analizarán las ventajas de introducir un núcleo 5G

independiente; y la conectividad dual que traerá la posibilidad de que un dispositivo se conecte simultáneamente a una red 5G y LTE.

En lo relacionado con el 5G, hay muchos aspectos que siguen dependiendo de la tecnología 4G. Esta fase del 5G que no es independiente es lo que conocemos como 5G *Non Standalone* y se estudiará en comparación con una fase más avanzada como es el 5G *StandAlone*, donde las tecnologías tienen un propósito de avanzar hacia los estándares del 5G sin la necesidad de apoyarse en tecnologías 4G.

En la actualidad, este desarrollo de las tecnologías está suponiendo un cambio en la forma en la que invierten los operadores, y las preferencias de los clientes a la hora de comprar dispositivos. Se analizará la oferta mundial del 5G, cuántos operadores están ofreciendo dispositivos con estos avances y lo que ello repercute, ahora y en un futuro, en la economía global.

ACRÓNIMOS

• NMT	<i>Nordic Mobile Telephony</i>
• 5G	<i>Fifth Generation</i>
• FM	<i>Frecuencia Modular</i>
• SMS	<i>Short Message Service</i>
• 3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
• DAS	<i>Distributed Antenna Systems</i>
• GSM	<i>Global System for Mobile</i>
• UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications Systems</i>
• LTE	<i>Long Term Evolution</i>
• GHz	<i>Gigahertzios</i>
• ITS	<i>Intelligent Transport System</i>
• MTC	<i>Machine Type Communication</i>
• TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio</i>
• MC	<i>Midnight Commander</i>
• TDM	<i>Time-Division Multiplexing</i>
• P25	<i>Project 25</i>
• NR	<i>New Radio</i>
• MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
• DSS	<i>Dynamic Spectrum Sharing</i>
• IAB	<i>Integrated Access Backhaul</i>
• IOT	<i>Internet Of Things</i>
• LBT	<i>Listen Before Talk</i>
• IIOT	<i>Industrial Internet Of Things</i>
• URLLC	<i>Ultra Reliable Low Latency Communication</i>
• V2X	<i>Vehicle To Everything</i>
• DL	<i>Downlink</i>
• UL	<i>Uplink</i>
• PRS	<i>Position Reference Signals</i>
• FWA	<i>Fixed Wireless Access</i>
• CPE	<i>Customer Premises Equipment</i>
• Gbps	<i>Gigabytes Por Segundo</i>
• CPS	<i>Cell Specific Reference Signal</i>
• OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
• SDN	<i>Software-Defined Network</i>
• LDPC	<i>Low Density Parity Check</i>

• PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
• SCH	<i>Shared Channel</i>
• DM-RS	<i>Demodulation Reference Signal</i>
• QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
• CSIRS	<i>Channel State Information Reference Signal</i>
• PTRS	<i>Phase Tracking Reference Signal</i>
• MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
• ARIB	<i>The Association of Radio Industries and Businesses</i>
• ATIS	<i>The Alliance for Telecommunications Industry Solutions</i>
• EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
• MME	<i>Mobility Management Entity</i>
• HSS	<i>High Speed Steel</i>
• SGW	<i>Service Gateway</i>
• PGW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
• PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
• PCEF	<i>Policy and Charging Enforcement Function</i>
• eNB	<i>evolved Node B</i>
• 5GC	<i>5G Core</i>
• I/O	<i>Input/Output</i>
• NSA	<i>Non standalone</i>
• NF	<i>Network Function</i>
• SLA	<i>Service Level Agreement</i>
• PDU	<i>Power Distributor Unit</i>
• SIB	<i>System Information Block</i>
• NFV	<i>Network Function Virtualization</i>
• NGCN	<i>Next Generation Core Network</i>
• ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
• NG-RAN	<i>Next Generation-Radio Access Network</i>

1. Introducción y objetivos

A medida que la sociedad avanza, el mundo está cada vez más globalizado y, la tecnología ha de avanzar constantemente para facilitar el intercambio de conocimientos, tanto económicos como culturales entre distintos países.

Todo empezó cuando la prestigiosa compañía Ericsson lanzó el sistema *Nordic Mobile Telephony* de 450 MHz NMT 450, el cual operaba mediante la utilización de canales de radio analógicos [1], a través de modulación en frecuencia modulada FM, más tarde se introdujo el servicio de *Short Message Service* SMS y las modulaciones digitales y con ello llegó el 2G, allá por el 2004 se optó por añadir internet a los terminales y desplegar el 3G. Por último, se añadió la banda ancha y, con ello, la posibilidad de ver contenido en *streaming*, bajo el sistema conocido como 4G.

Todo esto se verá obsoleto con la próxima llegada del 5G, caracterizado por el aumento de la velocidad de carga y descarga, un tiempo de latencia mínimo, entre otras características destacadas [2]. El aspecto más importante serán todas las tecnologías en las que se investigará y avanzará para alcanzar los estándares propuestos por la asociación 3GPP por medio de sus distintos lanzamientos, como la infraestructura necesaria para su total despliegue y el coste que se deberá afrontar, lo cual será objeto de estudio en este proyecto.

En cuanto a los objetivos, ante la llegada de esta nueva tecnología, se propone realizar una investigación preliminar sobre los medios previstos para que el 5G llegue a todos los usuarios, es decir, la infraestructura tecnológica con componentes como *Distributed Antenna Systems* (DAS), el *backbone* basado en red de fibra óptica o las posibilidades del *Edge computing*, una tecnología que crea una red en malla de microcentros de datos que acerca al usuario la red de almacenamiento en Internet conocida en términos simples como “nube” reduciendo el tiempo de latencia, así como la forma de combinarlas para llegar al mayor número posible de usuarios. También se pretende estudiar y describir el coste que supondrá el despliegue de toda esta infraestructura.

El trabajo se centrará en el estudio comprensivo, aunque no necesariamente detallado, del conjunto de tecnologías que se pretende que garanticen las condiciones

del servicio de la conexión 5G, con el fin de aprender y comprender como se combinan los diferentes desarrollos tecnológicos para poder cumplir los objetivos previstos en el estándar.

Se investigará y recopilará información acerca de esta tecnología, de cómo tiene que ir siendo más independiente de la anterior generación a través del despliegue de nueva infraestructura y, en concreto, acerca de toda la infraestructura que se desplegará, la forma en la que los operadores actuarán para ofrecer unos servicios en base a esta nueva conexión, su coste y el impacto que tendrá en la economía global para poder elaborar un informe centrado en el estado actual de la tecnología.

En el capítulo 2 se hará una introducción acerca de las utilidades y ventajas del 5G, los estándares que se pretenden alcanzar en el futuro, el desarrollo de nuevos sistemas de comunicaciones radio y las tecnologías que han ido evolucionando hasta conseguir los niveles de velocidad, latencia y cobertura deseados.

En el capítulo 3 se hará un estudio de las diferentes formas en las que se está implementando esta tecnología, el paso de utilizar tecnologías 5G con infraestructura ya utilizada por 4G a desplegar una nueva infraestructura que permita superar barreras de velocidad y, por último, un repaso del impacto que está teniendo y va a tener en la sociedad.

2. Tecnologías que conforman el 5G

El 5G son las siglas utilizadas para definir a la **quinta generación** de tecnologías de telefonía móvil. No es sólo un avance en velocidad respecto al 4G, sino que también supone un gran avance en términos de latencia y cantidad de dispositivos conectados por metro cuadrado, entre otros aspectos.

Como podemos observar en la figura 1, las **8 especificaciones principales** de la tecnología 5G son la mejora de la tasa de datos, es decir, el número de bits por unidad de tiempo que se transmiten que va a ser de entre 10 y 100 veces mayor que el anterior 4G; la amplitud de su disponibilidad de hasta casi el 100% y una cobertura del 100%; la reducción del tiempo de latencia traída por el avance que supone la tecnología *Edge computing*; la mejora de la velocidad en redes con gran capacidad para transportar información, conocida como velocidad de banda ancha; mayor duración de la batería en dispositivos que dependen de una conexión a Internet; menor consumo energético y mayor capacidad de dispositivos conectados por área.

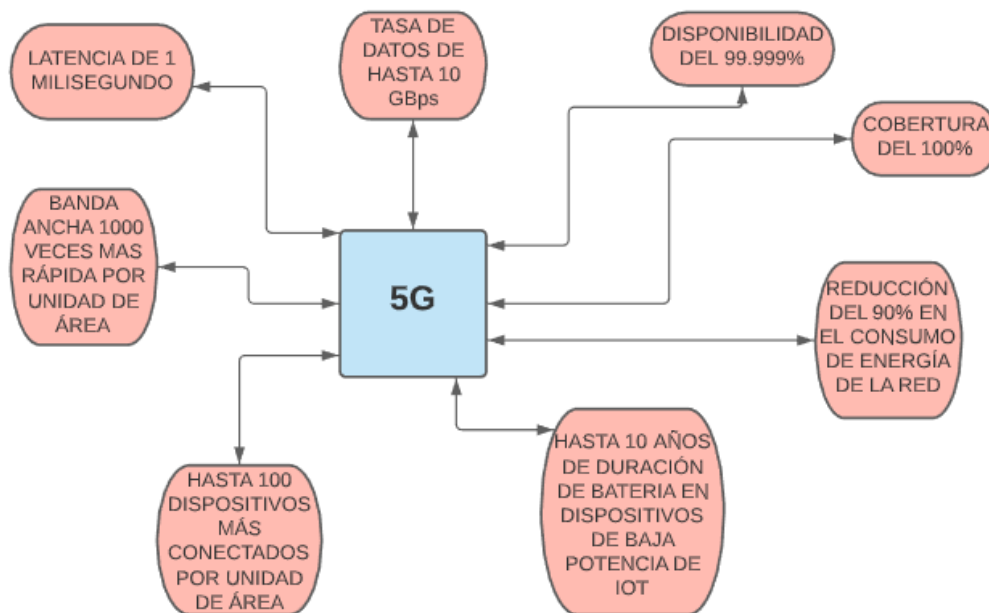


Figura1. Esquema de las principales mejoras que supondrá el 5G de elaboración propia.

La tecnología 5G surge de la necesidad de proporcionar **conectividad ubicua** para aplicaciones que van desde cirugía remota, cuya aplicación consistiría en robots

quirúrgicos manejados por cirujanos mediante una consola que ya empiezan a tener cierta implantación, hasta coches autónomos en los que esta tecnología se implantaría para llegar a la conducción sin asistencia humana absoluta mediante la comunicación de estos vehículos entre sí, así como desactivación de explosivos en los que los robots también necesitarán de esta tecnología para operar de forma milimétrica en zonas de alto riesgo, por mencionar sólo algunas de las más señaladas.

Con la conectividad 5G se generará el soporte de internet preferente para cerrar la brecha de las personas desconectadas, lo cual es de gran necesidad en países donde hay una amplia zona rural y no existe esa capacidad de estar conectado a la red a gran velocidad y con una cobertura óptima.

La importancia de la seguridad de los sistemas de comunicaciones en cada país, sabiendo que un ataque cibernético que tire todas las comunicaciones de un país podría suponer un mal irreparable para esa economía, trae consigo una guerra comercial entre las dos grandes potencias tecnológicas, Estados Unidos y China. Debido a la falta de confianza de un país al utilizar infraestructura ajena, ambas economías inician una batalla para monopolizar las redes 5G y así, controlar el flujo de información e ir un paso por delante en labores de **inteligencia** y **contrainteligencia** de cara a proteger sus intereses y los datos de millones de usuarios.

El 5G no es una simple tecnología, sino que es el conjunto de muchos avances en sistemas de comunicación de radio y tecnologías con el fin de alcanzar una serie de estándares propuestos por la asociación 3GPP. Estos estándares se han ido lanzando con el paso del tiempo, de forma progresiva, consiguiendo evolucionar lo ya creado para el 4G y adaptarlo a las nuevas necesidades de la quinta generación.

2.1 Diferentes lanzamientos de 3GPP

El estándar 5G está bajo el amparo del 3GPP, que es una colaboración de distintos grupos de telecomunicaciones como *The Association of Radio Industries and Businesses* (ARIB) o *The Alliance for Telecommunications Industry Solutions* (ATIS) entre otros, cuya misión es abordar estándares. La forma en la que estas tecnologías se van

actualizando se aprecia en los diferentes lanzamientos de versiones. Ha sido un largo y amplio estudio continuado hasta conseguir la versión que hoy tenemos del 5G. Hasta el lanzamiento 14, todo se había centrado en el desarrollo de las tecnologías *Global System for Mobile* (GSM), *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) y LTE.

2.1.1 Lanzamiento 14

En el **lanzamiento 14 (2017)** [3], se desarrollaron elementos en el camino hacia el 5G basados en la evolución de LTE, y el desarrollo de una nueva tecnología de acceso por radio llamada NX [8], que es una interfaz aérea 5G que se dirigirá a despliegues extremos de banda ancha móvil. Además, se refiere a escenarios de uso de alto ancho de banda y tráfico, así como a nuevos escenarios que involucran comunicaciones de misión crítica y en tiempo real con requisitos extremos en términos de latencia y confiabilidad. NX ofrece un modo de suministrar conexiones sin caídas y con mayor capacidad, tanto para las personas como para las cosas, gracias a una conexión, al mismo tiempo, a distintas antenas, y que permite una transmisión de distintos paquetes al dispositivo móvil, conocida como multipunto con MIMO distribuido. El avance previo desde LTE se centraba en mejoras de versiones anteriores con el espectro ya existente hasta 6 GHz, mientras que la nueva tecnología NX se centra en un espectro donde LTE no existía, apuntando específicamente a frecuencias altas de hasta cerca de 100 GHz.

En la figura 2 se observa la relación entre LTE y NX, viéndose los espectros y las bandas de frecuencia de cada caso a los que se refiere cada tecnología.

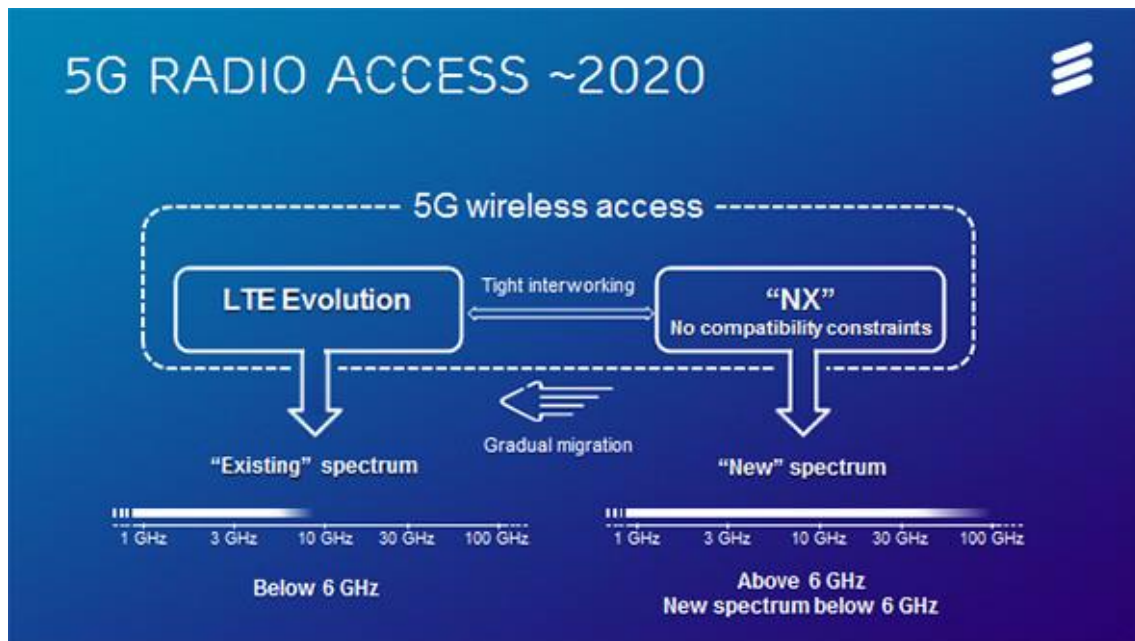


Figura 2. Esquema del acceso radio 5G elaborado por Ericsson.

En la evolución de LTE podemos destacar la reducción de latencia, el soporte completo para transmisiones de enlace ascendente en espectro sin licencia, nuevos casos de uso, por ejemplo en el área de sistemas de transporte inteligente (*Intelligent transport service*, ITS), la comunicación masiva de tipo máquina (*machine type communication*, MTC) en la que se mejorará su capacidad y se buscará nuevas funciones para sus dispositivos, y por último, *Massive MIMO* en el que se trata de usar una gran cantidad de elementos de antena para reducir la tasa de error e incrementar la tasa de datos.

En la parte de NX, como ya hemos mencionado, se buscará abordar las bandas de frecuencias más altas. Al ser una tecnología nueva, este lanzamiento busca focalizarse en crear una sólida base para que en un futuro se puedan sacar nuevas versiones.

En este lanzamiento, también se desarrolla un estrecho *interworking* entre las bandas de alta frecuencia que se utilizan para aumentar la capacidad y velocidad en áreas específicas y las bandas de baja frecuencia que proporciona cobertura de área

amplia. De tal forma, LTE y NX pasan a tener una amplia cobertura complementaria entre las frecuencias bajas (LTE) y las altas (NX).

2.1.2 Lanzamiento 15

Con el **lanzamiento 15** [4] se lanza el primer conjunto de estándares 5G, también actualiza las comunicaciones de misión crítica y las funcionalidades de los servicios de *Midnight Commander* (MC) en los que se promoverá el *interworking* entre el sistema MC establecido por 3GPP y los sistemas heredados, como la *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA) [5]. TETRA son redes digitales de asignación dinámica de canal con capacidad de transmisión de voz y datos en la que se emplea *time-division multiplexing* (TDM) cuyas principales características son el uso de una banda de frecuencia más baja para una menor necesidad de equipos repetidores, infraestructura propia separada de las redes de telefonía móvil públicas, menor grado de saturación del canal ya que tiene que haber, por norma, una capacidad superior al doble de los canales convencionales en uso y permisividad de comunicaciones grupales. Otro sistema heredado es *Project 25* (P25) que se trata de un estándar de comunicaciones digitales por radio [9], que destaca por su facilidad de operar, su posibilidad analógico o digital y su perfeccionamiento en eficiencia de espectro radioeléctrico con espacio para crecer incluso en áreas donde el espectro está sobrepoblado y las agencias lo tendrán difícil para conseguir licencias.

Con el estándar de 3GPP hay unas mejoras significativas, incluyendo 5G *New Radio* NR que consiste en una nueva tecnología de acceso de radio.

Estos nuevos avances impulsan la transmisión de datos y video sin interrupciones y permite la mejora de la calidad de servicio en múltiples industrias tales como las de transporte inteligente en la que se experimenta una mejora en aspectos; las industrias relacionadas con telepresencia médica que se hará más rápida y organizada; y en las relacionadas con ciudades inteligentes impulsado por *internet of things* (IoT) para evitar la congestión de tráfico.

2.1.3 Lanzamiento 16

Con el **lanzamiento 16** [6] se le añade mejoras al 5G NR [7] de MIMO y *Beamforming*. Presenta mejoras en el manejo del haz y la retroalimentación del estado del canal que aumentan el rendimiento, reducen los gastos generales y proporcionan robustez adicional. También se avanza en el aspecto de compartir espectro dinámico, en el que el denominado *dynamic spectrum sharing* (DSS) proporciona una solución eficiente en la transición 4G – 5G al permitir que LTE y NR compartan el mismo. En esta versión también se introducen nuevos escenarios de implementación para el 5G NR, de los cuales, los más notables los encontraremos en:

- Acceso y *backhaul* integrados (IAB): Se extiende el *backhaul* de fibra al NR para admitir *backhaul* inalámbrico; en tema de arquitectura, IAB se basa en la división de la estación base en dos partes: una unidad centralizada y una o más unidades distribuidas.
- NR en espectro sin licencia: Los mecanismos de acceso al canal basados en escuchar antes de hablar (*listen before talk*, LBT) son probablemente el área de mejora más obvia en la versión 16.
- Funciones relacionadas con IIoT y URLLC: Se pretende aumentar el número de casos de uso potencial como, por ejemplo, la automatización de fábricas. Un avance importante es la introducción del soporte para redes sensibles al tiempo en 5G NR.
- Sistemas de transporte inteligente (*intelligent transport systems*, ITS) y comunicaciones de vehículo a cualquier cosa (V2X): Esto se ve traducido en mejoras en el consumo de combustible al reducirse la congestión de tráfico ya que el sistema de cada automóvil sabrá la situación de congestión del tráfico y podrá actuar en consecuencia
- Posicionamiento: se diferencian posicionamiento basado en *downlink* (DL) que proporciona una nueva señal de referencia de posicionamiento (PRS) con una estructura más regular que el LTE y un ancho de banda mucho mayor; y el posicionamiento basado en *uplink* (UL) que utiliza las señales de referencia de sondeo.

- Por otro lado, esta versión se centra en reducir la latencia y aumentar la capacidad del sistema de lograr velocidades más altas a través de conectividad dual que es la capacidad de conectarse a dos frecuencias utilizadas por las redes WI FI domésticas (2,4 y 5GHz) [26], así como hacer un uso de la energía del equipo de una forma más eficiente y ahorradora.

A continuación, se muestra un resumen de los distintos lanzamientos 3GPP

LANZAMIENTO 3GPP	FECHA DE LANZAMIENTO	DETALLES
Lanzamientos anteriores	-	GSM, UMTS y LTE
Lanzamiento 14	Mediados de 2017	Elementos en el camino hacia 5G
Lanzamiento 15	Final de 2018	Especificación 5G Fase 1
Lanzamiento 16	2020	Especificación 5G Fase 2
Lanzamiento 17	Septiembre de 2021	Aún por especificar

Figura 3. Resumen de los lanzamientos 3GPP de elaboración propia

2.2 Sistemas de comunicación de radio

Estos sistemas juegan un papel importante a la hora de mejorar las comunicaciones, aumentar la cobertura al ampliar las bandas de frecuencia de los enlaces en los que se actuará y proporcionar un mayor número de conexiones y tráfico.

2.2.1 Sistema New Radio

El 5G NR no es solo una versión más evolucionada de LTE que admite velocidades de datos más altas, sino que, además, se puede usar para comunicaciones masivas de máquinas, donde una mayor cantidad de dispositivos están conectados a una estación

base, o para URLLC donde los dispositivos dependen de una latencia muy baja para realizar su tarea.

Otras diferencias que destacar entre 5G NR y LTE son, a nivel de capa física, las frecuencias portadoras: NR opera en dos rangos de frecuencias, las bandas inferiores a 6 GHz y las bandas milimétricas (de 30 a 300 GHz), mientras que LTE solo se implementa por debajo de 6 GHz. Pasando a puntos más detallados, en la capa física, el **espaciado entre subportadoras** en LTE era de 15 KHz, sin embargo, ahora puede coger valores entre 15 y 240 KHz lo que es para muchos la clave para muchas características de 5G.

Esto quiere decir que cuando el espaciado entre subportadoras es de 15 KHz, el ancho de banda es de 50 MHz y, a medida que el espaciado entre subportadoras va aumentando, el ancho de banda lo irá haciendo como vemos en la figura 4. Cuando se hace un espaciado de 240 KHz se tiene que reducir a la mitad el número de subportadoras lo que hace que el ancho de banda permanezca igual que con el de 120 KHz.

Espaciado entre subportadoras (KHz)	15	30	60	120	240
Máximo ancho de banda (MHz)	49.5	99	198	396	397.4

Figura 4. Table que relaciona el espaciado de subportadoras y el ancho de banda de elaboración propia

Una ventaja de esto es que permite acortar el tiempo de transmisión de un símbolo *orthogonal frequency division multiplexing* OFDM para obtener latencias más cortas en la capa física [17].

5G NR conserva el concepto de trama de 10 milisegundos dividida en 10 subtramas, como vemos en la figura 5, cada una de 1 milisegundo e introduce un concepto de ranura diferente al de LTE, la cual permite alcanzar asignaciones distintas de enlace descendente y ascendente [16].

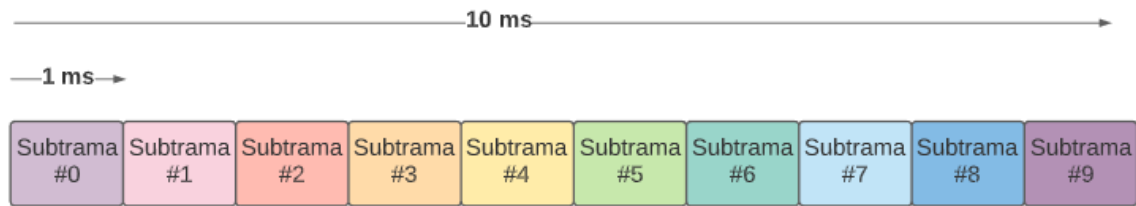


Figura 5. División de 5G NR en subtramas de elaboración propia

Existe una cadena de canales compartidos de enlace descendente, que incluye:

- La codificación LDPC, que son códigos lineales cuya propiedad esencial es la de tener por lo menos una matriz de paridad de baja densidad, es decir con pocos elementos distintos de cero [19].
- Una cadena de canales compartidos de enlace descendente físico
- Elementos de recursos que están asignados para la transmisión *physical downlink shared channel* (PDSCH)
- Diferentes tipos de mapeo

El canal compartido de enlace descendente, o *downlink shared channel* (DL-SCH), es el canal que transporta los datos del usuario. También transporta otras informaciones, como los diferentes tipos de bloques de información del sistema (*system information block*, SIB). La cadena de codificación incluye como vemos en la figura 6 los pasos habituales, como *cyclic redundancy check* (CRC), segmentación de bloques de código, coincidencia de tasas y concatenación, todos los pasos con los que estamos familiarizados con LTE

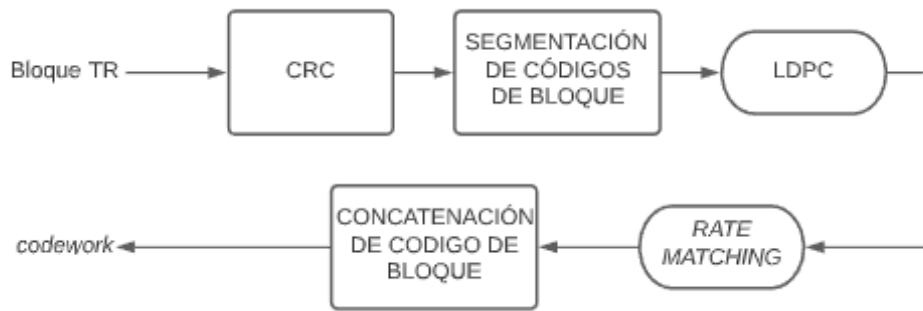


Figura 6. Cadena de codificación de elaboración propia.

El canal compartido físico de enlace descendente es altamente configurable, mucho más que en LTE. Se configura tanto por la información de control del enlace descendente, que puede cambiar de una ranura a otra, como por el control de recursos de radio, que también puede configurar algunos parámetros. No hay mucha novedad aquí en comparación con LTE.

En la figura 7 encontramos un esquema del procesamiento del SCH con aleatorización (*scrambling*), modulación (*modulation*), mapeo de capas (*layer mapping*), precodificación para procesamiento MIMO (*precodification*) y mapeo de recursos (*resource mapping*). Si bien todos esos son bloques conocidos, hay algunas diferencias que vale la pena señalar. Principalmente, el paso de precodificación no se especifica explícitamente en el estándar, aunque se espera que esté presente.

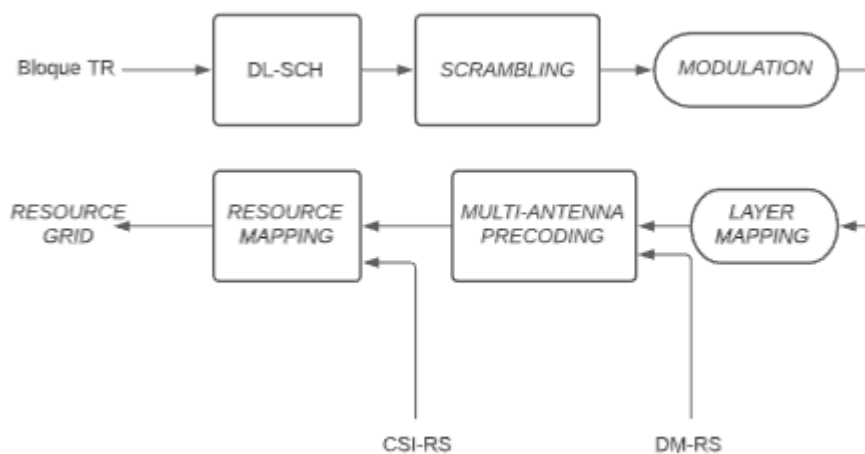


Figura 7. Esquema de las etapas del procesamiento del SCH de elaboración propia.

5G NR utiliza exactamente la misma lista de modulaciones en el enlace descendente que LTE, desde *Quadrature phase Shift Keying* (QPSK) hasta 256 *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

Los símbolos PDSCH se asignan primero a bloques de recursos virtuales. Cuando se asignan a la cuadrícula, los símbolos PDSCH evitan ubicaciones reservadas para otros fines. Esto incluye todas las señales físicas, DM-RS, *channel state information reference signal* CSIRS, y *Phase Tracking Reference Signal* (PTRS). Esto también incluye cualquier bloque de recursos que sea utilizado total o incluso parcialmente por bloques de señales de sincronización o SSB (*synchronization signals block*).

Para concluir con el 5G NR, hay que señalar que la cantidad de señales siempre activas se ha reducido, entre otras cosas, para ahorrar energía. Al trabajar con frecuencias portadoras más altas, las señales, para evitar pérdidas de propagación, deben formar un haz, por lo que es poco útil proporcionar *cell specific reference signal* (CRS) que son señales que se usaban como referencia para la demodulación y estimación de la calidad del canal [15].

2.2.2 Red central 5G NextGen

La red central 5G *NextGen*, NG jugará un papel clave para permitir el rendimiento del sistema de comunicaciones móviles 5G.

La definición de la arquitectura de próxima generación es responsabilidad del Grupo de Especificaciones Técnicas de Arquitectura de Sistemas (SA) de 3GPP sobre aspectos de servicios y sistemas. La fase de estudio, completada en 2016, describió cómo será esta nueva red central, conocida como NG *Core*, o red central *NextGen*.

Su arquitectura, tal y como vemos en la figura 8, se divide en 2 partes. La zona *Next Generation – Radio Access Network* (NG-RAN) en la que hay nodos gNB y ng-ENB y la zona del 5GC en la que encontramos *Access Mobility Function* (AMF) con *User Plane*

Function (UPF), AMF es el responsable de interactuar con el plano de datos desacoplado, crear actualizaciones y eliminar sesiones de unidad de datos de protocolo (PDU) y gestionar el contexto de sesión con la UFP que representa la evolución del plano de datos de una estrategia de Separación del plano de usuario y control [37].

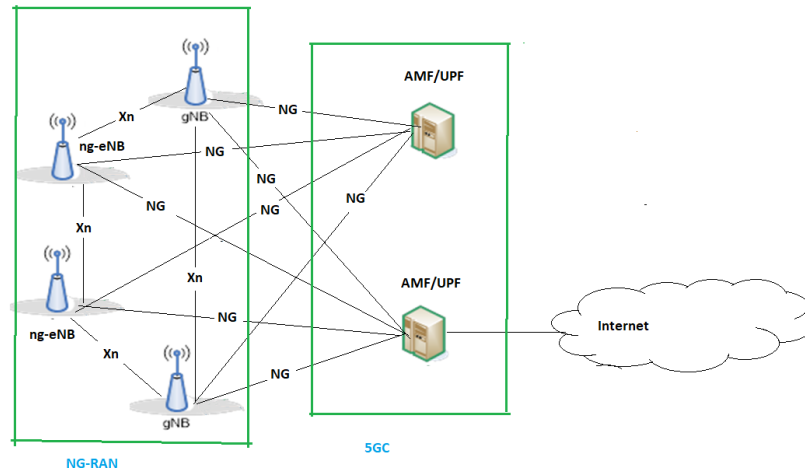


Figura 8. Arquitectura de 5G *NextGen* elaborada por *devopedia.org* [37].

Los requisitos de la red para 5G serán particularmente diversos. En un caso, se necesitan comunicaciones de ancho de banda muy alto, y en otras aplicaciones existe la necesidad de una latencia extremadamente baja, y luego también existen requisitos para comunicaciones de baja velocidad de datos para aplicaciones de máquina a máquina y de IoT.

Entre esto habrá comunicaciones de voz normales, navegación por Internet y todas las demás aplicaciones que hemos usado y nos hemos acostumbrado a usar.

Como resultado, la red 5G *NextGen* deberá adaptarse a una gran diversidad de tipos de tráfico y deberá poder adaptarse a cada uno de ellos con gran eficiencia y eficacia. A menudo se piensa que cuando un sistema se adapta a todos los enfoques no brinda el rendimiento óptimo en ninguna aplicación, pero esto es lo que se necesita para la red 5G.

Para lograr los requisitos de la red 5G se están empleando una serie de técnicas. Esto hará que la red 5G sea considerablemente más escalable, flexible y eficiente. Estas técnicas son:

- **Software-Defined Networking (SDN):** utilizando redes definidas por software, es posible configurar dinámicamente la red utilizando software en lugar de hardware. Esto proporciona mejoras significativas en términos de flexibilidad y eficiencia.
- **Network Function Virtualization (NFV):** Reemplaza las funciones de red en dispositivos específicos, tales como encaminadores, equilibradores de carga y cortafuegos, con instancias virtualizadas que pueden ejecutarse en soportes físicos disponibles en el mercado, reduciendo así el coste de las modificaciones y actualizaciones de la red. Es un enfoque de red en evolución que permite la sustitución de dispositivos de hardware dedicados y costosos tales como routers, firewalls y equilibradores de carga con dispositivos de red basados en software que se ejecutan como máquinas virtuales en servidores estándares de la industria [33]
- **Segmentación de la red:** Permite dividir una red física en múltiples redes virtuales (segmentos lógicos) capaces de soportar diferentes RAN o tipos de servicios para ciertos segmentos de clientes, reduciendo en gran medida los costes de construcción de la red gracias a un uso más eficaz de los canales de comunicación.

El rendimiento requerido para la red 5G NextGen ha sido definido por NGMN (*Next Generation Mobile Network Alliance*), que es una asociación de operadores móviles, proveedores, fabricantes e institutos de investigación y, utilizando la experiencia de todas las partes, es capaz de desarrollar las estrategias para las redes móviles de próxima generación, como la 5G.

Como tal, la red central 5G NG podrá utilizar niveles mucho mayores de flexibilidad para poder cumplir con los requisitos crecientes y diversos que le imponen la red de

acceso por radio y el mayor número de conexiones y tráfico mediante un uso eficaz del espectro que ahora infrautilizan otros servicios para proporcionar capacidad adicional a un coste inferior [10].

2.3 Otras tecnologías relacionadas con 5G

Son muchas las tecnologías que conforman el 5G como hoy lo conocemos. A continuación, veremos algunas de las más importantes que con su desarrollo e implantación han conseguido un avance tecnológico importante en el mundo de las telecomunicaciones y, en concreto, a la hora de desarrollar en la tecnología 5G.

2.3.1 *Edge computing*

Esta tecnología se podría definir como la tecnología que permite que los datos que producen los dispositivos IoT, es decir, aquellos objetos que están conectados a Internet, sean procesados en el lugar en el que se generan (una plataforma petrolífera, un coche conectado, una planta industrial, etc.), evitando tener que enviarlos en su conjunto hasta un *data center* externo o a una plataforma *cloud*.

Hay dos conceptos que son necesarios conocer para poder entender esta tecnología que son el ***cloud computing*** y **IoT**.

Esta primera, conocida como “nube” y está muy presente en nuestras vidas, al subir archivos a plataformas de intercambio de archivos o, incluso, al mirar el correo. Los pasos que se siguen cuando se ingresa en alguna de estas plataformas son: el dispositivo se conecta a Internet, a través de red fija o inalámbrica; el operador lleva los datos desde el dispositivo hasta el centro de procesamiento más cercano; y, por último, a través de una dirección IP o una web, pasa los datos hasta el servidor destino.

El servidor en cuestión procesa los datos, opera con la información y devuelve una respuesta, todo este proceso lo podemos ver resumido en la figura 9. Por ejemplo:

cuando se realiza una conexión a Gmail a través del dispositivo de usuario, se solicita al servidor de Google que muestre el estado actual de la bandeja de entrada, este procesa tu solicitud, consulta en su base de datos si hay correo nuevo y devuelve la respuesta que se visualiza en la pantalla. Como los datos están en la nube, da igual el dispositivo desde el que se haga.

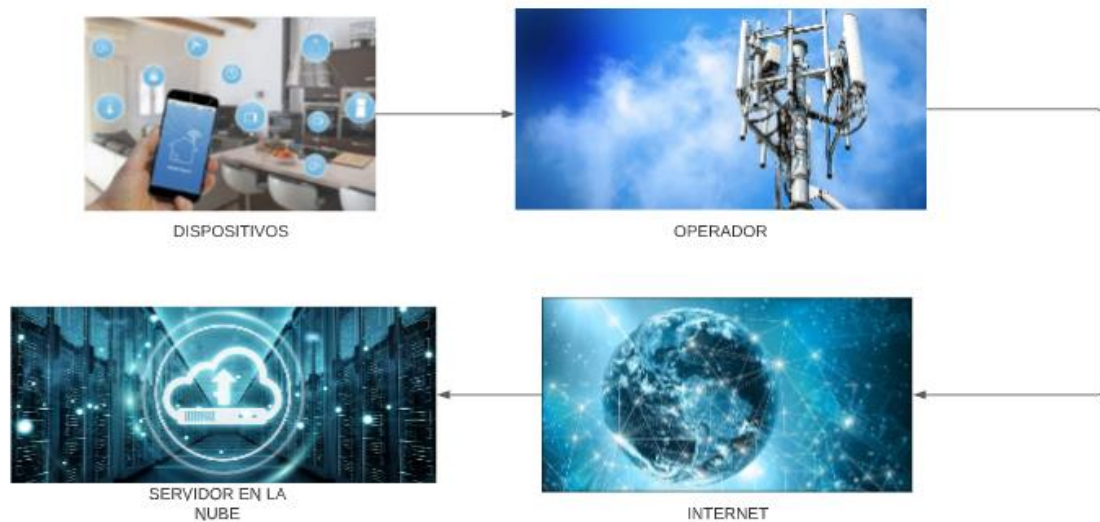


Figura 9. Esquema de *cloud computing* de elaboración propia.

Una desventaja de esta tecnología es que si el servidor está lejos (miles de kilómetros) los datos tendrán que ir allí y volver, esto es prácticamente inapreciable, pero hay casos en los que cada milisegundo que pasa es importante y se requiere una latencia tan baja como sea posible. Algunos de los casos tienen que ver con el Internet de las cosas (IoT) que es un sistema usado por cerca de 20 mil millones de dispositivos entre los que se encuentran termostatos, bombillas, asistentes virtuales o, incluso, coches como Tesla. Todos los datos de estos dispositivos realizan el recorrido que se explicaba más arriba y, en alguno de estos casos se necesita que el recorrido no sea tan largo y, de esa forma, reducir el tiempo de latencia.

Para resolver este problema encontramos el *Edge computing*, que consiste en acercar el poder de procesamiento lo más cerca posible de donde los datos están siendo generados como podemos apreciar en la figura 10. Es decir, consiste en acercar la nube hasta el usuario, hasta el borde mismo (*edge*) de la red. Este borde depende del dispositivo; en redes móviles puede ser un *smarthpone* o una antena; en una conexión de fibra puede ser un *router*. Todos estos dispositivos tienen procesadores, es decir,

pueden procesar y manejar datos. Al acercar el servidor al dispositivo final se hace más corto el viaje de ida y vuelta de los datos y, por lo tanto, el tiempo de latencia [22].

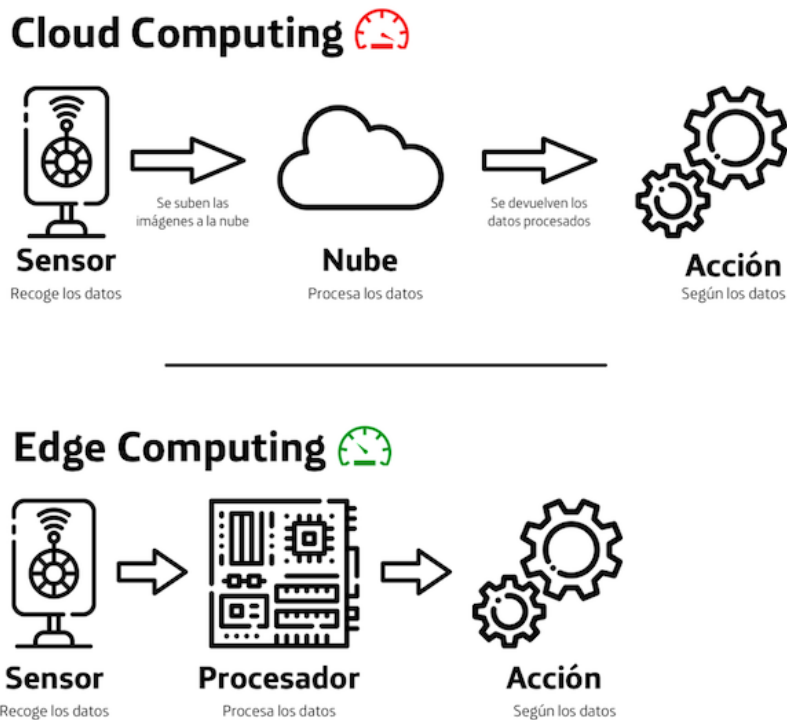


Figura 10. Comparativa entre *cloud computing* y *Edge computing* elaborado por *blogthinkbig.com*

En el 5G, uno de los estándares que se pretenden alcanzar es el de reducir la latencia de 50 milisegundos que consigue el 4G a 1 milisegundo. Con esta tecnología, esto ya está al alcance.

Se puede observar un ejemplo real de *edge computing* en el uso de la realidad virtual y aumentada. Por lo general, la realidad virtual y aumentada se ve afectada por un ancho de banda insuficiente y una latencia alta. Quienes utilizan esas tecnologías tienen problemas frecuentes con las velocidades bajas o la potencia informática, lo cual interrumpe la capacidad de lograr una experiencia envolvente. Para evitar estos problemas, el *edge computing* permite que se descarguen a la nube las partes del proceso que consumen muchos recursos informáticos. Otro ejemplo es la implementación de esos mismos procesos en el Internet de las cosas (IoT), como los automóviles inteligentes. Es inimaginable que haya latencia mientras el vehículo procesa

la información sobre las direcciones. Al igual que el resto de los dispositivos del Internet de las cosas (IoT), un automóvil inteligente debe procesar los datos y tomar decisiones en tiempo real o lo más rápido posible.

Otros de los beneficios es que se incluye la capacidad para agregar y analizar datos masivos in situ, lo cual permite tomar decisiones casi en tiempo real. El *edge computing* reduce aún más el riesgo de exponer los datos confidenciales, ya que mantiene toda esa potencia informática y los datos en un lugar cercano. Esto permite que las empresas controlen mejor la proliferación de la información, como los secretos comerciales del sector, o que cumplan con las políticas normativas, como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR).

Por último, los clientes empresariales disfrutan de la flexibilidad y los costos relacionados con el *edge computing*. Al mantener la potencia informática más cerca de su fuente, los sitios regionales pueden seguir funcionando independientemente del sitio central, incluso si este último deja de funcionar. Además, esto permite reducir considerablemente el costo que debe pagar por el ancho de banda para trasladar los datos entre los sitios regionales y centrales.

Uno de los problemas principales del *edge computing* es la distribución, para solventarlo se han desarrollado algunas soluciones como:

El **escalamiento horizontal** que es la capacidad de un sistema para mantener la misma calidad a pesar del crecimiento de usuarios, este escalamiento hacia varios sitios pequeños puede resultar más complicado que agregar la capacidad equivalente a un centro de datos principal. Las empresas más pequeñas pueden tener dificultades a la hora de gestionar el aumento de los costos generales de las ubicaciones físicas.

Por lo general, los sitios de *edge computing* se encuentran en lugares remotos y no cuentan con la experiencia técnica suficiente. Si se produce algún fallo in situ, se debe tener una infraestructura disponible que los empleados locales sin experiencia técnica puedan reparar con facilidad y que un pequeño grupo de especialistas ubicados en otro lugar pueda gestionar de manera centralizada.

Es necesario que las operaciones de gestión del sitio se puedan reproducir en todos los sitios de *edge computing* para simplificar la gestión, facilitar la resolución de problemas y evitar que la configuración de software presente pequeñas diferencias entre los sitios, lo que se conoce comúnmente como "desajuste en la configuración".

Si bien el *edge computing* ofrece un mayor control sobre los flujos de información al restringir los datos geográficamente, la seguridad física del sitio suele ser mucho menor. Esto puede dar como resultado un mayor riesgo de situaciones desfavorables a causa de accidentes, por ejemplo, la desconexión de un cable por error [21].

2.3.2 BeamForming

Más allá de los estándares, hay tecnologías que mejoran la transmisión inalámbrica, y éste es el caso de *BeamForming*, que permite a la infraestructura de la WLAN ajustar las señales de radiofrecuencia enviadas y determinar cuál es el mejor camino que deberían tomar para alcanzar un dispositivo receptor.

BeamForming es una manera de manejar la señal de radiofrecuencia a través de un punto de acceso para transmitir la señal por más de una antena. Funciona enviando múltiples señales y analizando el *feedback* (señales de vuelta) de los dispositivos clientes como vemos en la figura 11. Así, la infraestructura de la red inalámbrica puede ajustar estas señales enviadas y determinar cuál es el mejor camino que deberían tomar para alcanzar un dispositivo cliente.

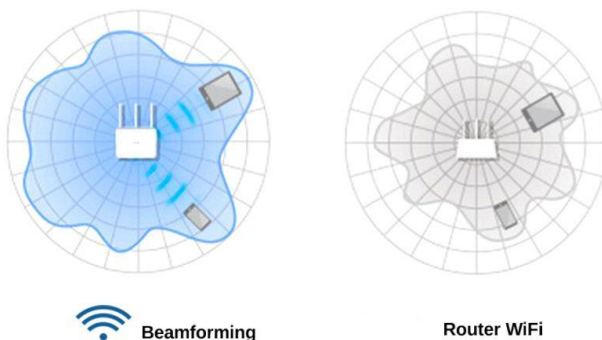


Figura 11. Comparativa *Beamforming* con un router WIFI realizada por siliceo.es

Para concretar este proceso de ajuste, se utiliza un algoritmo básico de retardo-y-suma de programación que coordina la señal transmitida a través de la red por más de una antena a la vez, con lo cual los clientes ven mejorada notablemente la intensidad de la señal.

Esto se logra mediante una serie de técnicas como la llamada *Direction Sensing* la cual sirve para que los sensores detecten la dirección de entrada de la señal y enfoquen la transmisión en esa dirección para así incrementar la fuerza de la señal inalámbrica y hacerla más estable; *MultiPath* (múltiples caminos) que aprovecha que las señales inalámbricas alcanzan su destino por rebote y crea múltiples caminos hacia el dispositivo final para así, en el caso de que falle uno, tener otro camino disponible. Se utilizan *buffers* especiales que permiten reagrupar estos paquetes y tener una transmisión sin pérdida de éstos y mucho más fiable.

Las características más destacadas de esta tecnología son que coordinan la señal enviada de cada antena, mejorando la señal del enlace; su utilización se requiere cuando el receptor tiene una sola antena; su uso se recomienda en complejos, oficinas y residencias de múltiples pisos ya que, al haber más señales, se mejora la señal de radiofrecuencia; acorta los tiempos de envío y recepción mediante la utilización de las dos técnicas mencionadas anteriormente (*direction sensing* y *multipath*) sin perder estabilidad; permite un ancho de banda mayor; otros dispositivos sufren el rebote de señal. Sin embargo, *Beamforming* los utiliza para proporcionar una mejor señal al dispositivo cliente [23].

2.3.3 MIMO

Como ya se ha visto durante el desarrollo de este trabajo, esta tecnología se ha utilizado con mucha frecuencia en relación con el 5G, utilizándose en los diferentes lanzamientos de 3GPP para alcanzar las prestaciones. Se refiere específicamente a la forma cómo son manejadas las ondas de transmisión y recepción en antenas para dispositivos inalámbricos como enrutadores.

MIMO aprovecha fenómenos físicos como la propagación **multicamino** para incrementar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error. En breves palabras MIMO aumenta la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrica por medio de la utilización del dominio espacial.

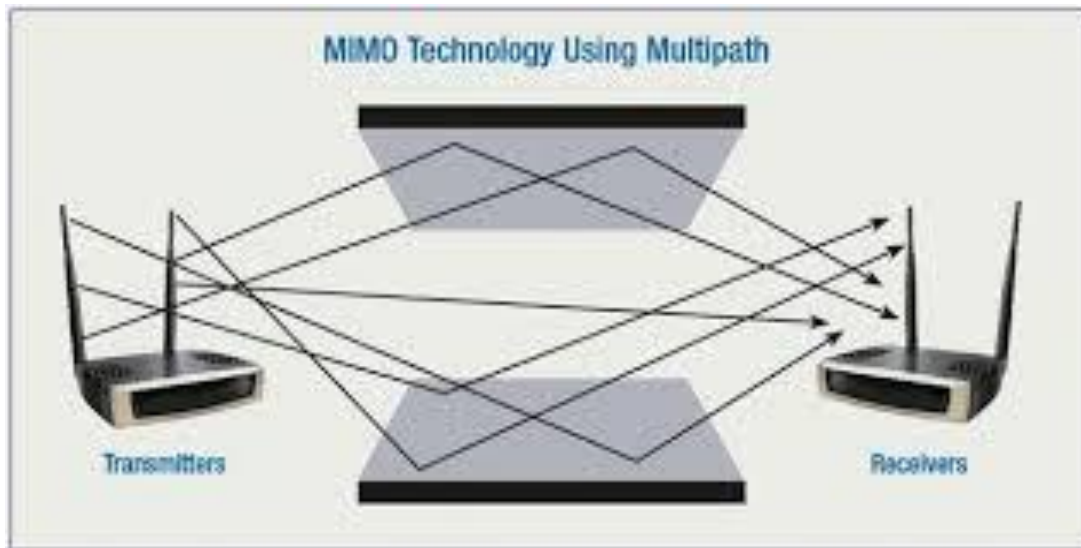


Figura 12. Mapa de señales que utilizan MIMO aprovechando *multipath* elaborado por comunicacionesinalambricashoy.es

Durante los últimos años la tecnología MIMO ha sido aclamada en las comunicaciones inalámbricas ya que aumenta significativamente la tasa de transferencia de información utilizando diferentes canales en la transmisión de datos o la multiplexación espacial por tener las antenas físicamente separadas [25].

3.Despliegues

Las diferentes arquitecturas que se están implementando para la consecución de un despliegue masivo con el fin de poder ofrecer estas tecnologías a nivel de mercado, así como el estudio de este mismo y las formas en las que los operadores están ofreciendo los distintos dispositivos con esta conexión 5G.

3.1 Diferentes opciones de implementación

La existencia de múltiples opciones de conectividad conlleva el riesgo de que distintos operadores implementen diferentes opciones, en un orden diferente y así avanzar de manera asíncrona, o contraproducente, no consiguiendo un óptimo despliegue para el avance en la consecución de los estándares. Para reducir esta complejidad y proporcionar pasos que lleven hacia una arquitectura con desarrollo a largo plazo existen 3 opciones de implementación que se van a describir [27].

3.1.1 Arquitectura LTE / EPC

La **primera opción** es la arquitectura basada en LTE / EPC (*Evolved Packet Core*), esta opción representa el núcleo evolucionado de una red LTE. Según la asociación 3GPP, esta opción está incluida en las opciones de implementación inicial del 5G, sin embargo, la industria tecnológica no la cuenta para basar su despliegue inicial debido a su poca evolución respecto al 4G. Tiene diferentes nodos que ofrecen múltiples funcionalidades, las principales son autenticación, gestión de servicios, configuración de portadores y aplicación de diferentes *Quality of Service* (QoS).

Esta arquitectura, mediante sus nodos hace que la red central LTE funcione; autentica suscriptores; determina el acceso a los suscriptores a la red y ayuda fundamentalmente a la gestión de movilidad. Como vemos en esta figura 13, el nodo de radio 5G se apoya en el nodo 4G para señalización, que está controlada por un núcleo 4G evolucionado EPC.

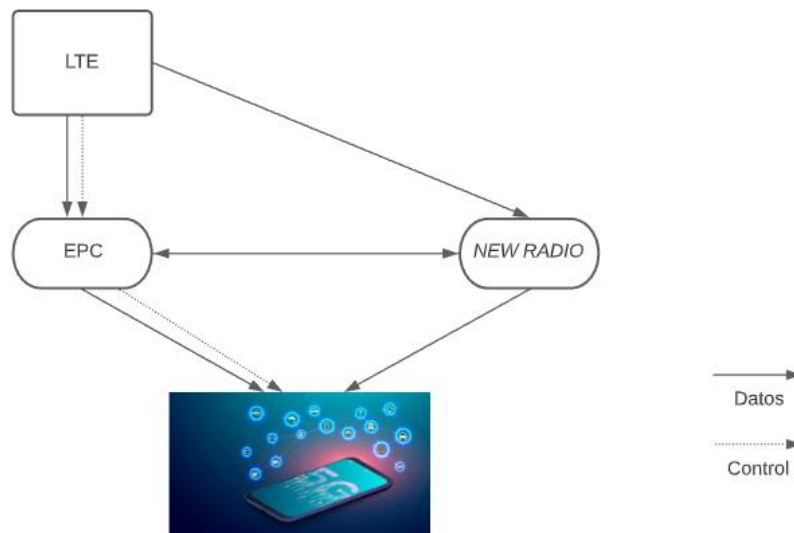


Figura 13. Esquema de LTE/EPC de elaboración propia.

Los principales nodos son *Mobility Management Entity* (MME), *High Speed Steel* (HSS), *Service Gateway* (SGW), *Packet Data Network Gateway* (PGW).

El **MME** está ubicado en el borde de LTE EPC, entre la red central y la red de radio. El MME es responsable de manejar las señales entre los UE activos y la red dentro de la arquitectura LTE EPC. También es responsable de la señalización entre los *Evolved node B* (eNB) y la red central. Este eNB es el hardware que está conectado a la red de telefonía móvil que se comunica directamente de forma inalámbrica con teléfonos móviles [28]. Para una funcionalidad continua, MME autentica los usuarios comunicándose con el HSS, y la función de movilidad permite que el equipo de usuario acceda a la red y realice un seguimiento de su ubicación y estado.

El **HSS** es la base de datos central que contiene todos los detalles relevantes sobre la información del suscriptor y la autenticación del usuario. *Home Subscriber Server* también proporciona información para las llamadas y la configuración de la sesión IP. Este servidor facilita a los proveedores de servicios la gestión de la información de sus suscriptores en tiempo real. Una red móvil regular necesita solo un HSS, pero puede existir más de uno. Si hay dos o más, deben comunicarse entre sí y actualizar sus bases de datos porque los servidores necesitan tener una base de datos sincronizada para funcionar correctamente.

Un nodo de puerta de enlace de servicio (**SGW**) no se encarga de los datos de señalización que se utilizan, sino que maneja el tráfico de datos del usuario. Transporta datos IP desde el equipo usuario a la red principal LTE. El SGW también enruta los paquetes IP entrantes y salientes para una mejor colaboración del sistema y sirve como un ancla para el equipo de usuario cuando se mueve de un eNB a otro.

En la figura 14, podemos observar las conexiones entre los *eNodeB* e internet, a través de los diferentes nodos.

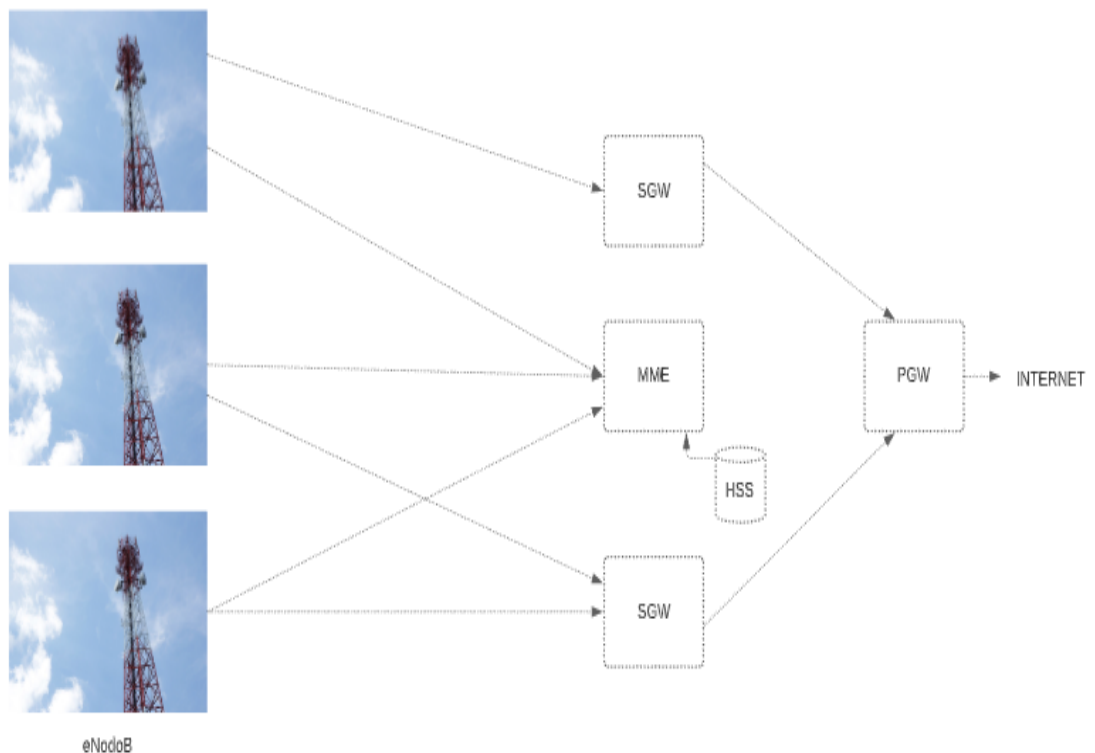


Figura 14. Esquema de los diferentes nodos de LTE EPC de elaboración propia.

En esta arquitectura, también encontramos nodos relacionados a la calidad de servicio, como *Policy and Charging Rules Function* (PCRF) y *Policy and Charging Enforcement Function* (PCEF).

PGW es el nodo de red que conecta el EPC a redes IP externas. Lo que hace el PGW es que enruta paquetes hacia y desde redes IP externas. Más allá de eso, también

asigna una dirección IP a todos los móviles o equipos de usuario y aplica diferentes políticas con respecto al tráfico de usuarios de IP, como el filtrado de paquetes.

El nodo **PCRF** que especifica la política de servicio y la información de QoS. Este nodo garantiza que los usuarios recibirán servicios de acuerdo con el contrato, lo que significa que los servicios se cobran en consecuencia. También se asegura de que el sistema de carga esté definido.

Por último, **PCEF** se asegura de que se cumplan las reglas de PCRF, decidiendo así si los datos deben pasar por PGW o no.

Los beneficios de usar la red central de LTE se ven, sobre todo, en la Calidad del servicio (QoS). Esta Calidad de servicio es un conjunto de parámetros que especifica límites de rendimiento mínimos y máximos sobre el tipo de servicio que recibe un usuario. Se puede utilizar para garantizar que los usuarios dispongan de una determinada cantidad mínima de velocidad o que no superen una determinada cantidad máxima.

Para los operadores, QoS les sirve como guía para el control de la asignación de los recursos en la red [29].

3.1.2 Arquitectura de destino con NR y 5GC independiente

La **segunda opción** es la arquitectura de destino con NR y 5G Core (5GC) independientes, ésta se puede implementar inicialmente para casos de uso específicos en áreas locales, donde los dispositivos se mantienen dentro de una buena cobertura de NR. El núcleo del 5G Core es el corazón de la red móvil, donde la ultra conectividad se traduce en diferenciación de servicios y flexibilidad empresarial. Establece conectividad confiable y segura a la red y acceso a sus servicios, determina la calidad del servicio y la aplica a través de políticas que permiten la diferenciación de servicios y maneja la movilidad de área amplia en toda la red. Es el 'final del negocio' de la banda ancha móvil y las redes de la *Input/output* (IO). En la figura 13 podemos observar cómo maneja el plano de control y de usuario desde el nuevo Core 5G.

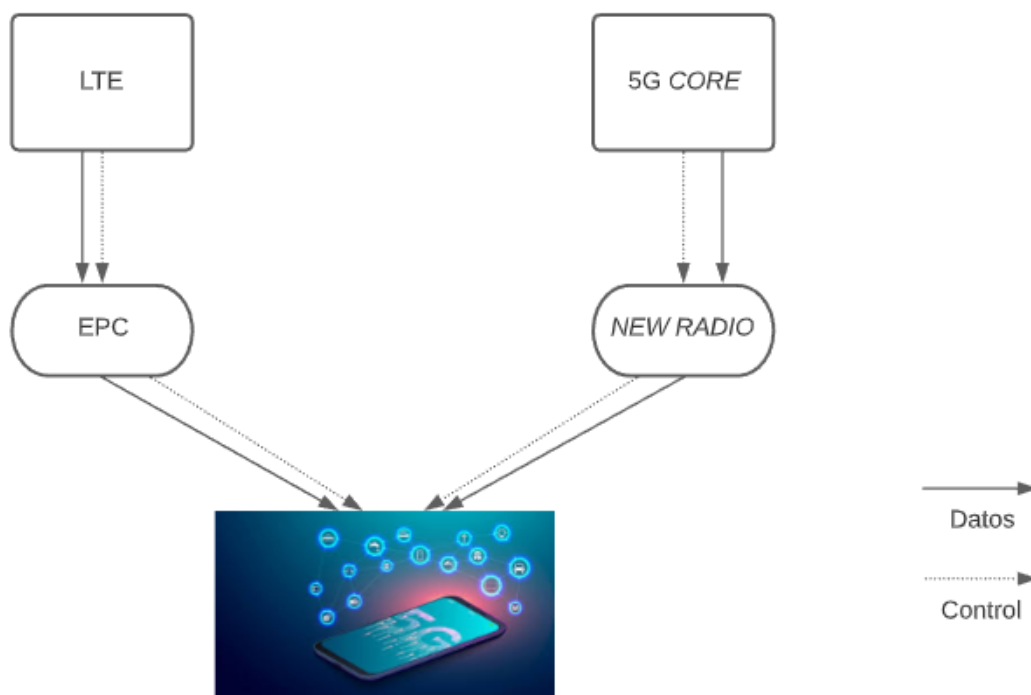


Figura 15. Esquema de red con 5GC independiente de elaboración propia.

En resumen, 5GC es un factor importante para la evolución de la red 5G. Mejora la experiencia final, simplifica operaciones y mejora las capacidades de red debido a su arquitectura [29]. Sin el 5GC, los casos de uso avanzados de 5G, como los juegos de realidad aumentada multijugador, nunca se materializarán.

Actualmente, todas las implementaciones comerciales de 5G se basan en la tecnología NR *non standalone* (NSA) que utiliza el acceso de radio LTE existente para la señalización entre dispositivos y la red, y las redes EPC que se han mejorado para admitir 5G NSA. Este enfoque permitió la introducción rápida de nuevos servicios 5G y, al mismo tiempo, maximizó la reutilización de las redes 4G existentes.

La arquitectura de la red 4G se definió para satisfacer las necesidades de la red móvil que existía en ese momento, pero hoy presenta ciertas limitaciones. Así es como la red de arquitectura 5G Core supera estas limitaciones.

Cuando varios expertos en la industria de las telecomunicaciones se reunieron para definir la nueva arquitectura 5GC, se responsabilizaron de definir una arquitectura no solo pensando en el presente, sino también en el futuro, elevando las comunicaciones móviles a niveles sin precedentes y haciendo posible la digitalización completa.

5GC está construido utilizando tecnologías nativas de la nube que son tecnologías que puede describir los patrones de organizaciones, arquitecturas y tecnologías que, de manera consistente, confiable y a escala aprovechan al máximo las posibilidades de la nube para admitir modelos comerciales orientados a la nube.

Cada función de red (*Network Function*, NF) tiene una combinación de pequeños trozos de código software llamado microservicios. Algunos de estos microservicios incluso se pueden reutilizar para diferentes NF, haciendo una implementación más efectiva y facilitando la gestión independiente del ciclo de vida, lo que permite implementar actualizaciones y nuevas funcionalidades sin generar un impacto en los servicios de ejecución.

La integración de nuevos NF puede generar un ahorro para los operadores móviles de hasta un 75 por ciento en las actividades de integración de la red al introducir una nueva función de red.

Esta arquitectura tiene varias mejoras en las capacidades de red como reducir el tiempo de comercialización de nuevos servicios y facilitar la gestión de servicios con una vida útil más corta, en otras palabras, permitirá que se lancen nuevos servicios rápidamente para probar la demanda del mercado y, si los servicios no funcionan, se pueden eliminar gradualmente con la misma facilidad.

Con 5G Core, los proveedores de servicios podrán proporcionar un mejor corte de red y ofrecer acuerdos de nivel de servicio (*Service Level Agreement*, SLA) de extremo a extremo a los clientes comerciales.

El soporte de *Edge Computing* en 5GC conseguirá múltiples propiedades nuevas para distribuir la funcionalidad del plano de usuario, dividir el tráfico en el borde y controlar dinámicamente la ruptura del tráfico. La reducción de la latencia, el aumento de la fiabilidad del servicio y el aislamiento del tráfico y los servicios contribuirán a una mejora general de la experiencia del usuario final.

La seguridad se mejora para asegurar la comunicación de un extremo a otro con un manejo de claves mejorado y un modelo de autenticación unificado para aplicaciones y usuarios de red.

Esta tecnología es lo suficientemente futurista como para respaldar las necesidades de nuestra industria en el futuro previsible. Pero lo mejor de todo es que está disponible ahora y en los próximos años transformará empresas y sociedades [30].

3.1.3 Conectividad dual

Esta **tercera opción** se trata básicamente de permitir que un dispositivo se conecte simultáneamente a una red 5G y LTE transmitiendo y recibiendo datos por ambas interfaces aéreas logrando así un mayor rendimiento que conectándose sólo a una de ellas y unas velocidades de banda ancha mucho mayor a las hasta ahora obtenidas [31].

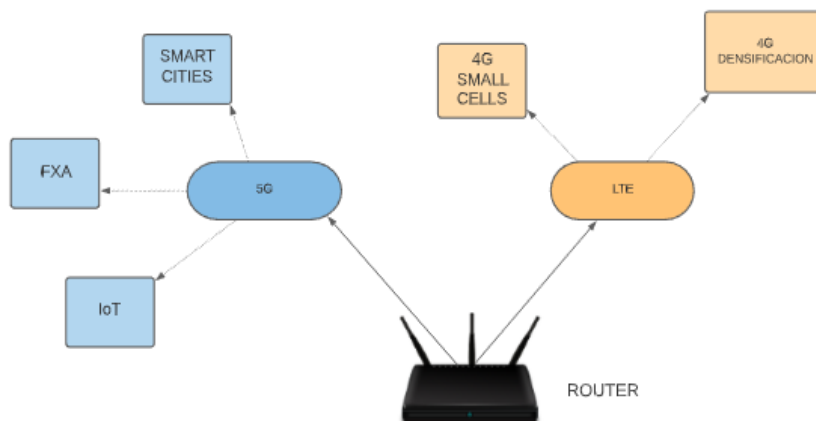


Figura 16. Esquema de conectividad dual de elaboración propia.

En esta figura 16 se puede ver un *router* con conectividad dual que aprovechará las ventajas de ambas redes, como la densificación del LTE ó la capacidad para que los dispositivos de IoT se conecten a Internet gracias a su conectividad 5G, entre otras.

Las dos bandas en las que se emiten simultáneamente señales son 2.4GHz y 5GHz, esta última está menos congestionada lo que hace que se genere menos ruido e interferencias y además permite una mayor velocidad mediante el uso simultáneo de varios canales. Lo malo de la banda de 5GHz es el alcance, no consiguiendo tanto como la de 2.4GHz.

Con la combinación de ambas se consigue una velocidad propia de una banda poco congestionada y un alcance bastante amplio, es decir, se consigue lo mejor de cada uno [32].

3.2 5G NSA vs 5G SA

La implantación del 5G por fases no es algo nuevo ya que ocurrió de la misma forma con el 4G donde se empezó con unas velocidades máximas de hasta 150 Mbps y, más tarde, se fueron aumentando.

5G *Non Standalone* (NSA) es la parte del 5G que aún depende de tecnologías 4G, se implementa manteniendo el núcleo de red EPC del 4G y, en cuanto a la radio, aún evoluciona de LTE a NR. Sin embargo, la parte con el 5G SA evoluciona tanto la parte radio (NR), como el núcleo *Next Generation Core Network* (NGCN). Ambas utilizan un espectro radioeléctrico destinado para el 5G.

5G NSA ha sido el primero en implantarse, gracias a él los poseedores de smartphones que lo soporten podrán beneficiarse de una mayor velocidad de descarga que se incrementará hasta los 2 Gbps, una latencia que cae hasta los 15 ms, y una mayor estabilidad y fiabilidad en la conexión, incluso en movilidad o en aglomeraciones, gracias a tecnologías como *Massive MIMO*.

5G SA es la etapa más revolucionaria al posibilitar la implementación de futuros servicios como la conducción autónoma, gracias a la combinación de tecnologías como el *Network Slicing*, que es una técnica utilizada para dividir una red en múltiples redes virtuales que pueden soportar diferentes *Radio Access Network* (RAN), con otras prometedoras como el *Mobile Edge Computing* que ayudarán a tener latencias ínfimas en torno a 1 ms. Las mejoras que notaremos más a nivel de smartphone serán las que se refieren al aumento de velocidades de subida, de descarga y a la ausencia de retardo.

Con el 5G SA, se segmentará la red en subredes con distintas capacidades de transmisión, velocidad y latencia, creándose redes con condiciones específicas para futuras aplicaciones en IoT industrial, juegos interactivos, redes empresariales, o comunicaciones críticas de mayor prioridad como escenarios de emergencias, conducción autónoma, operaciones a distancia usando un robot quirúrgico, etc. [34].

3.3 Oferta mundial del 5G actualmente

Estos últimos meses en los que el mundo se ha visto afectado por una pandemia mundial no han pasado en vano en el desarrollo del 5G.

En muchos países se tomó la opción de que un número de personas sin precedentes tuviera que trabajar desde casa, esto ha generado que la carga de tráfico cambiara geográficamente de los centros urbanos a las residencias, donde el tráfico fue absorbido por la red residencial fija y por los proveedores móviles. Esto hizo, como detalla el informe de movilidad de Ericsson [11], que se aumentaran los picos de uso de datos en un día, pasando de solo por la noche a varios al día y, para no perder calidad, se tuvo que recurrir a medidas que optimizaran el tráfico. También cabe destacar el aumento de las aplicaciones bidireccionales como videollamadas, idóneas para videoconferencias. Para soportar este tipo de aplicaciones se precisa de unas tecnologías avanzadas, como las relacionadas con el 5G.

Según la instantánea del mercado 5G en septiembre de 2020 [11], actualmente, 397 operadores en 129 países están invirtiendo en 5G, incluidas pruebas, adquisición de

licencias, etc., de los cuales 124 operadores han anunciado que han implementado tecnología compatible con 3GPP y, de ellos, 101 operadores de 44 países ya han lanzado uno o más servicios 5G compatibles con las especificaciones de 3GPP.

De estos operadores, 94 han lanzado servicios móviles 5G compatibles con 3GPP, 37 operadores lanzaron 5G *Fixed Wireless Access* (FWA) compatible con 3GPP o servicios de banda ancha para el hogar. Esta tecnología FWA es utilizada globalmente y goza de la inversión de hasta 426 operadores y 931 dispositivos que tienen este acceso. Después de los teléfonos, la categoría más frecuente es la forma de FWA que emplean una infraestructura clásica *Evolved Packet Core* (FWA CPE).

Respecto al uso del espectro 5G, las bandas superpuestas n77(3300 – 4200 MHz) y n78(3300 – 3800 MHz) son las que más se utilizan, en las que han invertido 173 operadores. En las bandas n257(25.50 – 29.50 GHz), n258(24.25 – 27.50 GHz) y n261(27.50 – 28.35 GHz) también se han identificado 123 operadores.

BANDA	ENLACE <i>UP/DOWN</i> (MHz)
n77	3300 - 4200
n78	3300 - 3800
n257	25500 – 29500
n258	24250 - 27500
n261	27500 - 28350

Figura 17. Tabla de bandas y su frecuencia en enlace ascendente / descendente

Actualmente, el número de dispositivos 5G para el cliente sigue aumentando, tanto los anunciados como los ya disponibles comercialmente. Según informe de GSA [11] son ya:

- **18 factores de forma** anunciados, entre ellos teléfonos, pantallas montadas en la cabeza, puntos de acceso, CPE de interior, CPE de exterior, laptops / notebooks, módulos, dongles / adaptadores, CPE de grado industrial / enrutadores / gateways / módems, drones, robots, tabletas, televisores, cámaras, módems USB, un interruptor y una máquina expendedora.
- **93 proveedores** que han anunciado dispositivos 5G disponibles o futuros.

- 401 **dispositivos** anunciados, de los cuales 190 ya están disponibles comercialmente.
- 181 **teléfonos**, de los cuales, al menos 138 se encuentran disponibles comercialmente.
- 100 **dispositivos CPE**, de los que 24 están disponibles comercialmente.
- 64 **módulos** para *Internet of Things* de los cuales 11 ya están disponibles comercialmente.

Se calcula que el 80% de la inversión que harán los operadores en los próximos 5 años en tecnología móvil irán destinados al 5G [12].

En el ámbito nacional, Vodafone España ya está ofreciendo 5G, con velocidades de descarga de hasta 1Gbps y latencia *ultra low*. Se ofrece desde la banda de 3.7 GHz, ya que el resto aún no ha salido a subasta, y en 3 dispositivos diferentes, que son los que comercializa este operador. Este operador garantiza una buena experiencia en exteriores que es donde este espectro potencia la cobertura, pero en interiores aseguran que también está habiendo buenos resultados [13].

El resto de operadores han decidido esperar hasta la segunda subasta de dividendo digital de la banda 700MHz para desplegar otras tecnologías independientes de la infraestructura 4G como es la 5G *Standalone*, una tecnología cuyo núcleo NGCN ya no depende del 4G LTE [14].

3.4 El impacto en la economía global del despliegue del 5G

Según el informe del *GSM Association* (GSMA) [35] para 2025 tendremos 1800 millones de conexiones 5G en las que liderarán el camino Asia y Estados Unidos. El 49% de la población estará conectada, tan sólo quedándose sin conectar aquellos que están dentro de la huella de la banda ancha de móvil pero no la utilizan (42%), y aquellos que no viven dentro de la huella de una red de banda ancha de móvil (9%).

En cuanto a suscriptores, se espera que en 2025 la cifra ronde los 5800 millones mientras que actualmente hay 5100 millones. Un aumento notable, pero no tanto como el de las conexiones IoT, que se duplicarán pasando de 12 millones a 24.5.

Este último año, los operadores están buscando formas de aumentar los ingresos y recortar los costes en un entorno de bajo crecimiento, lo cual es más complicado por los requisitos de demanda de servicios 5G (alta velocidad y baja latencia). Los operadores, por lo tanto, necesitan evolucionar sus redes para conseguir las demandas de la era 5G. Las empresas ven en la alta velocidad que trae el 5G un beneficio altamente reconocido, pero en otros aspectos, como el *Edge computing*, aún sigue el 4G siendo “suficientemente bueno” por lo que, hasta que no se termine de desplegar el 5G SA no llegarán muchos otros beneficios. El conocimiento del 5G de los consumidores está aumentando, pero aún hay una alta cantidad que no ve este avance lo suficientemente grande como para pagar más por ello, conformándose con el 4G.

Para el 2025 las conexiones 5G supondrán el 20% de todas las conexiones globales. Para soportar esto, los operadores harán una inversión de 1100 millones de dólares. Los ingresos totales globales han alcanzado los 1030 millones, y crecerán un 1% cada año hasta 2025. EL IoT será una parte integral de la era 5G, cuyo número de conexiones crecerá hasta más del doble, es decir, 25 millones por 12 que existen actualmente.

A finales de 2019, 5200 millones de personas se han suscrito a servicios móviles. Añadir nuevos suscriptores supone dificultades ya que los mercados se saturan y alcanzar las poblaciones rurales supone un aumento de la inversión. Sin embargo, habrá unos 600 millones de nuevos suscriptores para 2025.

Todo el mundo del móvil supone una gran contribución a la economía global. En 2019, las tecnologías móviles han generado 4100 millones de valor económico añadido globalmente. Esta cantidad llegará a 5000 millones por 2024 cuando los países aumenten sus beneficios debido a las mejoras en productividad y eficiencia. Las tecnologías 5G esperan contribuir 2200 millones a la economía entre 2024 y 2034.

Empresas de una gran variedad (como fabricación, generación de energía y aeroespacial) están evaluando sus opciones para digitalizar productos, gestión de montaje y operaciones generales. Esto presenta una oportunidad para los operadores que pueden ofrecer 5G con infraestructura complementaria para servicios de baja latencia. Sin embargo, ante la premisa de que el 4G sigue siendo suficiente para satisfacer las necesidades, China es una clara excepción a este respecto: las primeras asociaciones y los ensayos de operadores locales han pagado dividendos, como lo demuestra la intención generalizada entre empresas del sector industrial del país para utilizar 5G [35].

En la figura 18 podemos observar un resumen de lo que supondrá el avance del 5G en el mercado global, así como la previsión a corto plazo del incremento de la tasa de penetración y los beneficios que se obtendrán de la implantación del 5G.



Figura 18. Infografía del avance del 5G en el mercado global elaborado por gsma.com

En esta infografía se observa la difusión de una serie de elementos en el último año y su previsión de crecimiento hasta 2025 o, en caso del estudio de la aportación al PIB mundial, hasta 2024. Estos elementos son el actual número de suscriptores, los

usuarios de internet móvil, las conexiones a través de tarjetas SIM, las inversiones y beneficios de los operadores, el número de conexiones de los dispositivos con IoT, el número de smartphones, el porcentaje de conexiones 4G y 5G y la contribución de la industria móvil al PIB mundial.

Por otra parte, este despliegue de 5G también supondrá una alta inversión en medios para poder mantener el cifrado y así la privacidad del cliente, pero sin olvidar lo relacionado a la interceptación legal de las comunicaciones. Existe un alto riesgo de que la aplicación de técnicas que refuercen el anonimato de los usuarios de la red genere dificultades en temas de ciberseguridad. Por esto, hará falta una innovación constante que les permita mantener la seguridad en los procedimientos de investigación y prevención, lo que supondrá un alto coste.

4.CONCLUSIONES

Tras haber hecho un estudio de lo que se quiere alcanzar con la tecnología 5G, los avances tecnológicos que se requieren para esto y el impacto que tendrá en un futuro, tanto social, cultural como económicamente, se pueden sacar unas conclusiones con las que se pretende dar un enfoque genérico de cómo terminar de implantar la tecnología 5G, hasta el punto de que llegue a formar parte de nuestra vida como algo cotidiano.

Hace mucho tiempo que se viene hablando del desarrollo del 5G y durante este tiempo ha generado opiniones para todos los gustos. Para muchos es una simple tecnología que, de un momento a otro, se lanzará y todos la tendremos en nuestros nuevos smartphones, con una velocidad de transferencia de datos multiplicada, tampoco faltan detractores temerosos de que al aumentar el número de antenas para la ampliación de la cobertura de las nuevas redes 5G, la exposición a esas radiaciones, afecten a la salud.

Estos temores se vieron acentuados con la llegada de la pandemia del COVID 19, como lo demuestran los ataques que sufrieron las antenas y operarios que las instalaban en Gran Bretaña, según el operador de Telecomunicaciones *Openreach* [38], a pesar de que la OMS por la Comisión Internacional de Protección de Radiación no Ionizante (ICNIRP) haya negado que exista relación entre esta pandemia y el despliegue de nuevas antenas para la implementación del 5G. Según la OMS “hasta la fecha, y después de mucha investigación realizada, ningún efecto adverso para la salud se ha relacionado causalmente con la exposición a tecnologías inalámbricas”.

Los temores relativos a temas como la vulnerabilidad de la ciberseguridad o los problemas para la predicción meteorológica por las interferencias que puede producir compartir la misma banda, que también están latentes, son problemas que plantean nuevos retos que, de seguro, se solucionarán con una gestión racional del despliegue de infraestructuras.

Hemos de ser conscientes de que lo que antes se pensaba como tecnología del futuro, con logros que parecían de ciencia ficción, tales como la cirugía remota, coches autónomos, desactivación de explosivos, automatización industrial y todo lo relativo al internet de las cosas (IoT) hoy son una realidad al alcance de la mano. La 5G no es una simple tecnología, sino que es el resultado del desarrollo y avance de muchas tecnologías y sistemas de comunicación en busca de unos estándares que rozan la perfección en términos de velocidad, latencia y cobertura.

Estos estándares son los propuestos por la asociación 3GPP y en los cuales se basan todos los desarrolladores para ir implementando las distintas tecnologías que forman el 5G. No todas estas tecnologías empiezan de cero, sino que IoT, algunas son tecnologías que se usaban para el 4G y que han ido evolucionando y adaptándose a las nuevas necesidades de eficiencia y rapidez. En algunos casos, como en lo relacionado con el 5G NSA, es un arma de doble filo ya que no se termina de enfocar en la consecución de las metas del 5G debido a las limitaciones que imponen el uso de infraestructura antigua utilizada para el 4G.

Para la implantación del 5G en nuestras vidas cotidianas habría que centrarse en el desarrollo de las tecnologías 5G *Standalone* y el despliegue de la infraestructura nueva que así lo requiere. Para esto, hay que desarraigarse del LTE y centrarse en la implementación de la arquitectura con 5GC, núcleo independiente al LTE.

Pero el desarrollo de las redes 5G no sólo dependerán de esto, sino que necesitan la necesaria implicación de otros actores sociales tales como los operadores de telefonía, administraciones, organizaciones empresariales, profesionales y ciudadanas. Sólo de esta forma podremos conseguir el avance hacia un futuro donde se desarrollarán las llamadas ciudades inteligentes, vehículos inteligentes sincronizados con el entorno capaces de evitar accidentes, la utilización de robots en medicina con precisión micrométrica eliminando el factor humano que siempre traerá consigo más tasa de error, así como un ahorro energético.

Al terminar de desarrollar todos estos avances las previsiones que se esperan son bastantes buenas con cifras extraordinarias como las mencionadas en el apartado del impacto económico que se espera en el mercado global. Es por eso que los operadores

tienen que incrementar la inversión, como han ido haciendo estos años atrás, para así poder dar una amplia oferta a los clientes.

Para finalizar estas conclusiones, traigo una frase de Erick Emerson Schmidt, el empresario e ingeniero, que fue director ejecutivo de Google: “Los avances tecnológicos no pueden suceder sin científicos o ingenieros. El desafío de la sociedad es equiparar a las suficientes personas, con las habilidades correctas y formas de pensar, que lleguen a trabajar en los problemas más importantes.” La tecnología 5G es el futuro, una herramienta para la resolución de los problemas que se vayan planteando en la sociedad y, también, es un desafío en el que, como decía Schmidt en su frase, además de los profesionales, todos estamos implicados.

5.BIBLIOGRAFÍA

[1] <https://www.timetoast.com/timelines/historia-de-los-celulares-y-sus-generaciones>

[Último acceso:23-08-2020]

[2]https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/que-es-5g-y-como-nos-cambiara-vida_14449

[Último acceso:24-08-2020]

[3]<https://www.ericsson.com/en/blog/2015/6/release-14--the-start-of-5g-standardization>

[Último acceso:07-09-2020]

[4]<https://www.telit.com/blog/whats-in-3gpp-release-15-5g-standard-lte-improvement/>

[Último acceso:10-09-2020]

[5]https://www.anfer.com/site/productos_motorola_radiocomunicaciones_moviles_Voz_Datos_TETRA_DMR_PMR_MPT1327.html

[Último acceso:10-09-2020]

[6]<https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/5g-nr-evolution>

[Último acceso:07-09-2020]

[7] https://es.wikipedia.org/wiki/5G_NR

[Último acceso:07-09-2020]

[8] <https://www.redestelecom.es/infraestructuras/noticias/1081738001803/ericsson-crea-interfaz-aumenta-velocidad-5g.1.html>

[Último acceso:07-09-2020]

[9] <https://www.icomamerica.com/es/products/landmobile/p25/p25/default.aspx>

[Último acceso:07-09-2020]

[10]<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/technology-basics.php>

[Último acceso:07-09-2020]

[11]<https://gsacom.com/technology/5g/>

[Último acceso:07-09-2020]

[12]<https://www.computerworld.es/tendencias/5g-ya-funciona-en-24-mercados-de-todo-el-mundo#:~:text=5G%20traer%C3%A1%20%2C2%20billones,4%2C1%20billones%20de%20d%C3%B3lares.&text=En%20concreto%2C%205G%20aportar%C3%A1%20,en%20los%20pr%C3%B3ximos%2014%20a%C3%B1os>

[Último acceso:08-09-2020]

[13]<https://www.xataka.com/moviles/ponemos-a-prueba-velocidad-red-5g-vodafone-asi-navegar-movil-a-800-mbps>

[Último acceso:08-09-2020]

[14]<https://www.xataka.com/empresas-y-economia/orange-movistar-5g-serio-llegara-2021>

[Último acceso:08-09-2020]

[15]<https://es.mathworks.com/videos/5g-explained-introduction-to-5g-nr-phy-1558595604785.html>

[Último acceso:10-09-2020]

[16]https://www.rohde-schwarz.com/es/knowledge-center/videos/esclareciendo-la-5g-c-mo-se-definen-los-formatos-de-ranura-en-5g-nr-video-detailpage_251220-663445.html

[Último acceso:11-09-2020]

[17]<https://es.mathworks.com/videos/5g-explained-5g-waveforms-frame-structure-and-numerology-1558600202574.html>

[Último acceso:11-09-2020]

[18]<http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/90205/6/supermantillaTFM0119memoria.pdf>

[Último acceso:11-09-2020]

[19][https://es.wikipedia.org/wiki/LDPC#:~:text=La%20comprobaci%C3%B3n%20de%20paridad%20de,canal%20de%20transmisi%C3%B3n%20con%20errores\).](https://es.wikipedia.org/wiki/LDPC#:~:text=La%20comprobaci%C3%B3n%20de%20paridad%20de,canal%20de%20transmisi%C3%B3n%20con%20errores).)

[Último acceso:12-09-2020]

- [20] <https://es.mathworks.com/videos/5g-explained-downlink-data-in-5g-nr-1558600809645.html>
- [Último acceso:13-09-2020]
- [21] <https://www.redhat.com/es/topics/edge-computing/what-is-edge-computing>
- [Último acceso:13-09-2020]
- [22] <https://empresas.blogthinkbig.com/edge-computing-que-es/>
- [Último acceso:14-09-2020]
- [23] [https://www.itsitio.com/ec/beam-forming-que-es-y-como-funciona/#:~:text=Beam%20Forming%20es%20una%20manera,vuelta\)%20de%20los%20dispositivos%20clientes.](https://www.itsitio.com/ec/beam-forming-que-es-y-como-funciona/#:~:text=Beam%20Forming%20es%20una%20manera,vuelta)%20de%20los%20dispositivos%20clientes.)
- [Último acceso:14-09-2020]
- [25] <https://es.wikipedia.org/wiki/MIMO>
- [Último acceso:14-09-2020]
- [26] <https://www.xatakamovil.com/wi-fi/que-wifi-doble-banda-que-te-interesa-tenerlo-tu-movil#:~:text=Esta%20denominaci%C3%B3n%20alude%20a%20la,sus%20capacidades%20difieren%20entre%20ellas.>
- [Último acceso:17-09-2020]
- [27] <https://www.ericsson.com/en/blog/2018/11/5g-deployment-options-to-reduce-the-complexity>
- [Último acceso:17-09-2020]
- [28] <https://en.wikipedia.org/wiki/ENodeB>
- [Último acceso:17-09-2020]
- [29] https://yatebts.com/solutions_and_technology/lte-epc/
- [Último acceso:19-09-2020]
- [29] <https://www.ericsson.com/en/digital-services/5g-core>
- [Último acceso:19-09-2020]
- [30] <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/5/why-do-you-need-a-5g-core-network-and-5g-nr-standalone>

[Último acceso:19-09-2020]

[31]<https://innovadores.larazon.es/es/nokia-anuncia-haber-alcanzado-las-velocidades-5g-mas-rapidas-del-mundo-en-su-red-de-dallas/#:~:text=Esta%20funcionalidad%20de%20conectividad%20dual,solo%20a%205G%20o%20LTE%E2%80%9D>

[Último acceso:20-09-2020]

[32]<https://www.xatakamovil.com/conectividad/dual-sim-todo-su-funcionamiento-tipos-que-nos-permite-hacer>

[Último acceso:20-09-2020]

[33]<https://www.ciena.com.mx/insights/what-is/What-is-Network-Functions-Virtualization-es-LA.html>

[Último acceso:22-09-2020]

[34]<https://www.xatakamovil.com/conectividad/que-5g-sa-stand-alone-que-importante>

[Último acceso: 23-09-2020]

[35]<https://www.gsma.com/mobileeconomy/wpcontent/uploads/2020/03/GSMA-MobileEconomy2020-Global.pdf>

[Último acceso: 24-09-2020]

[36]<https://blogthinkbig.com/virtualizacion-red-modelo-negocio-5g>

[Último acceso: 25-09-2020]

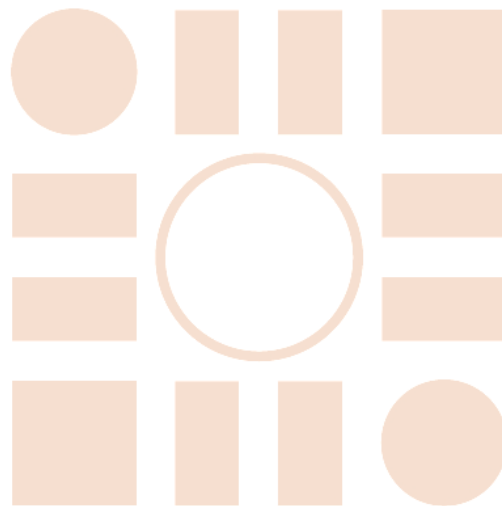
[37]<https://devopedia.org/5g-technology>

[Último acceso: 28-09-2020]

[38]<https://www.who.int/news-room/q-a-detail/5g-mobile-networks-and-health>

[Último acceso: 28-09-2020]

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá